

где  $\vec{n}$  - единичный вектор нормали к характеристической поверхности (6).

Подставим скорости  $V_1 = V_2$  в (10) и  $V_4 = V_5$  в (11).

Тогда коэффициенты при  $\vec{h}, \vec{h}^*$  обратятся в нуль и потому  $\vec{h}_n = \vec{h}_n^* = 0$ . Это означает, что векторы  $\vec{h}, \vec{h}^*$  лежат в касательной плоскости к поверхности (6), т.е. они являются скоростями поперечных волн. Если в (10) и (11) внесём соответственно скорости  $V_3, V_6$ , то окажется, что  $\vec{h}, \vec{h}^*$  отличаются численными множителями от  $\vec{n}$ , т.е.  $\vec{h}, \vec{h}^*$  направлены по нормали к поверхности и потому представляют скорости продольных волн.

Характеристическую гиперповерхность будем искать в виде, разрешённом относительно  $t$ :

$$z(X) - t = 0, p_0 = \frac{Z}{t} = -I.$$

Тогда из (6) получим:

$$g^2(\mu + \chi) = \rho, g^2(\lambda + 2\mu + \chi) = \rho, \\ g^2\gamma = \rho j, g^2(\alpha + \beta + \gamma) = \rho j.$$

Значит, образующие гиперповерхность  $z(x) = t$  бихарактеристики, должны удовлетворять следующим системам [4,5]:

$$\frac{dx_k}{dt} = \frac{\mu + \chi}{\rho} p_k, \frac{dx_k}{dt} = \frac{\lambda + 2\mu + \chi}{\rho} p_k, \\ \frac{dx_k}{dt} = \frac{\gamma}{j\rho} p_k, \frac{dx_k}{dt} = \frac{\alpha + \beta + \gamma}{j\rho} p_k, k = \overline{1,3}.$$

УДК 621.91-529:62-19

**Горбунов В.П., Григорьев В.Ф.**

## ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА ПО ПАРАМЕТРУ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

При обработке корпусных деталей на многоцелевых станках /МС/ с ЧПУ наиболее высокие требования точности предъявляются к параметрам основных отверстий, в частности линейных размеров, как диаметральных, так и межосевых расстояний. При этом допуски межосевых расстояний часто рекомендуются в пределах от 0.02 до 0.05 мм.

Точность межосевых размеров /допуск расположения осей/ формируется в основном выходными параметрами МС с ЧПУ. Рабочие органы станка при перемещении в заданную точку устанавливаются в положение, отличающееся от запрограммированного на величину позиционного отклонения. Область существования этой погрешности в рабочей зоне станка определяется объемом, ограниченными величинами проекций на рассматриваемые оси координат (рисунок 1). Данные погрешности установочных координатных переме-

Так как коэффициенты  $\mu, \lambda, \chi, \alpha, \beta, \gamma, \rho, j$  являются константами, то  $p_k$  также будут величинами постоянными [4], а, значит  $x_k$  будут линейными функциями от  $t$ , то есть бихарактеристики являются прямыми линиями. В каждом из случаев уравнением характеристического коноида (поверхность волны от точечного источника) будут

$$x_k = \frac{\mu + \chi}{\rho} p_k t, x_k = \frac{\lambda + 2\mu + \chi}{\rho} p_k t, \\ x_k = \frac{\gamma}{j\rho} p_k t, x_k = \frac{\alpha + \beta + \gamma}{j\rho} p_k t, k = \overline{1,3}.$$

В заключении отметим, что результаты этого исследования хорошо согласуются с [1,2], так как подтверждают существование шести типов волн (волн смещения, микровращения) и другие факты. Однако, поскольку при выводе уравнения характеристик учитываются только коэффициенты при старших производных по времени, то есть не всё уравнение, то эти результаты не всегда совпадают с выводами, полученными методами теории плоских волн. В то же время метод характеристик позволяет рассматривать типы волн отличных от плоских. В частности, метод характеристик позволяет выводить уравнения характеристических коноидов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Parfitt V.R., Eringen A. C. Reflection of plane wave from the flat boundary of a micropolar elastic halfspace. GTC, 1966.
2. Эринген А.К. Микрополяриная теории упругости. Разрушение т.2. М., 1975.
3. Новацкий В. Теория упругости. М., 1975.
4. Смирнов В.И. Курс высшей математики, том 4, часть 2. М., 1981.
5. Курант Ф. Уравнения с частными производными. М., 1965.

щений, рассмотренные вдоль направления перемещений, являются погрешностями позиционирования рабочего органа. Погрешность позиционирования на всей длине хода в общем виде определяется величиной  $P_\sigma$ , которая характеризуется систематической и случайной составляющими.

Случайная составляющая, то есть рассеивание, определяется через стабильность позиционирования и ее текущее значение для конкретной точки при одностороннем подходе равно шестисигмовой зоне распределения.

Систематическая составляющая погрешности характеризуется накопленным отклонением и в случае двухстороннего подхода к запрограммированной точке определяется зоной нечувствительности  $U$  /максимальной для всего хода рабочего органа и текущей для рассматриваемой точки/.

**Горбунов Виктор Петрович.** Доцент каф. "Машиноведение" Брестского государственного технического университета.  
**Григорьев Владимир Федорович.** Доцент каф. "Машиноведение" Брестского государственного технического университета.  
 БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.

Следует отметить, что существует также и угловое смещение за счет относительного поворота выбранной системы координат XYZ, так как происходит изменение ее положения и при установочных перемещениях, и из-за нестабильности параметров элементов конструкции станка во времени. Данная нестабильность параметров в процессе эксплуатации обуславливается тепловыми деформациями несущей системы станка, которые составляют большую долю в общем балансе погрешностей обработки на высокоточных станках и приводят к изменению относительного положения заготовки и инструмента. Тепловые деформации МС с ЧПУ вызывают смещение области существования выходного параметра, в частности, за счет смещения оси шпинделя в направлениях осей координат X, Y, Z и угловых поворотов вокруг этих осей [1].

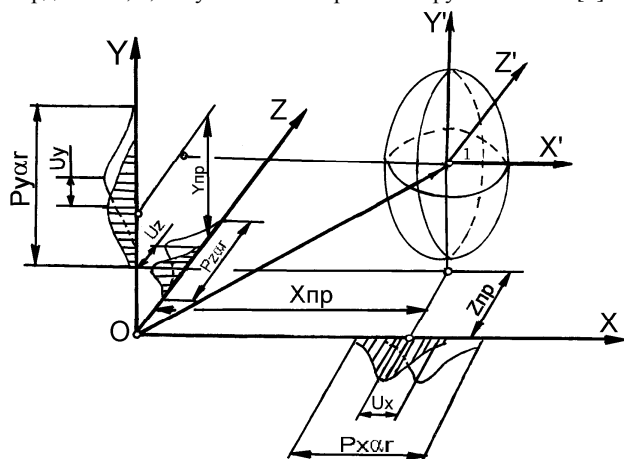


Рисунок 1. Формирование погрешности установочных перемещений в рабочем объеме станка

Помимо сказанного, при эксплуатации высокоточных станков важно обеспечить как требуемую точность обработки деталей, так и последующее ее длительное сохранение. Указанное свойство МС с ЧПУ характеризуется технологической /точностной/ надежностью. При этом выход заданного параметра качества /точности/ за допустимые пределы считается технологическим отказом и относится к параметрическим отказам.

Для оценки параметрической надежности металлорежущих станков, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации, при недостаточной информации можно опираться на общую модель потери изделия работоспособности [2].

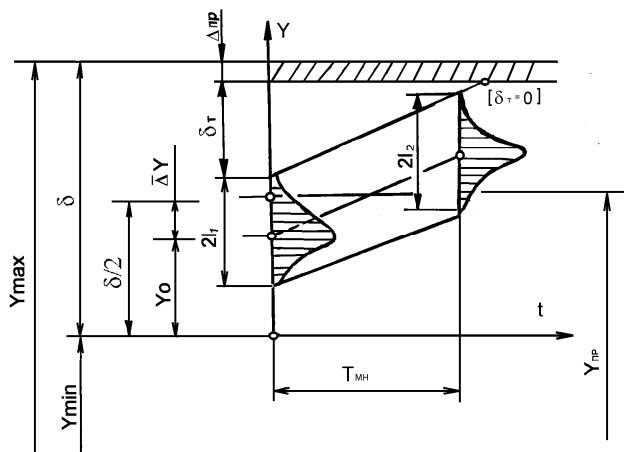
Используя общую схему потери работоспособности для МС с ЧПУ можно получить зависимости, связывающие показатели технологической надежности с выходными параметрами станка.

Для начального момента времени характерно преобладающее влияние систематических и случайных составляющих от погрешности позиционирования, то есть вдоль рассматриваемых направлений координатных перемещений. За межналадочный период  $T_{mn}$  произойдет смещение центра группирования за счет систематических составляющих от тепловых деформаций. При незначительном изменении рассеивания выходного параметра от его первоначального положения, что характерно для высокоточных станков, область существования данных выходных параметров может смещаться по прогнозируемому закону изменения положения оси шпинделя.

Основными показателями технологической надежности МС с ЧПУ, как и другого технологического оборудования, являются количественные показатели [2]:

$P(t)$  - вероятность безотказной работы по одному или нескольким параметрам, которая характеризует вероятность того, что в период времени его работы при  $T=t$  не возникнет отказа по вине МС с ЧПУ;

$\delta_m$  - резерв МС с ЧПУ по его выходному параметру:  $\delta_m = \delta - \delta_p$ , где  $\delta$  - допуск на выходной параметр,  $\delta_p$  - фактическое значение данного параметра при установленном уровне вероятности безотказной работы  $P(t)$ ;



$K_m$  - коэффициент резерва или запас надежности по выходному параметру МС с ЧПУ:  $K_m = \delta / \delta_p \geq 1$ ;

$\gamma_m$  - скорость изменения резерва станка по выходному параметру:  $\gamma_m = d\delta_m(t)/dt$ ;

$\gamma_k$  - скорость изменения коэффициента резерва станка по выходному параметру:  $\gamma_k = dK_m(t)/dt$ ;

$T_p$  - ресурс МС с ЧПУ по одному или нескольким выходным параметрам.

При шестисигмовом диапазоне рассеивания  $P(t)$  в начальном состоянии равняется:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left\{ \frac{(\delta - \Delta_p) - y_0}{l_1/3} \right\},$$

где  $\Phi$  - нормированная функция Лапласа ( $0 \leq \Phi \leq 0,5$ );  $\Delta_p$  - погрешность программирования;  $l_1$  - рассеивание выходного параметра относительно центра группирования;  $y_0$  - центр группирования размеров выходного параметра (рисунок 2).

Рисунок 2. Схема для прогнозирования технологической надежности многоцелевого станка с ЧПУ

В конце межналадочного периода произойдет уменьшение резерва МС с ЧПУ до  $\delta_m = (\delta - \Delta_p) - y_0 - \bar{\Delta}_c - l_2$  по выходному параметру за счет возможного изменения рассеивания  $l_2$  и смещения центра группирования от тепловых деформаций  $\bar{\Delta}_c$ .

Тогда  $P(t)$  составит:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left\{ \frac{(\delta - \Delta_p) - y_0 - \bar{\Delta}_c}{l_2/3} \right\}$$

В дополнение к основным показателям технологической надежности необходимо рассматривать также ряд частных показателей:

$K_1 = \delta_m / \delta$  который характеризует долю неиспользованного резерва выходного параметра;

$K_2 = l_{1,2}/\delta$ , характеризующий долю, которую в поле допуска  $\delta$  на выходной параметр занимают случайные составляющие погрешности;

$K_3 = l_0/\delta$ , характеризующий долю, которую в поле допуска  $\delta$  на выходной параметр занимают систематические составляющие погрешности ( $l_0 = y_0 + \Delta_c$ ).

Тогда запас надежности  $K_m$ , выраженный через коэффициенты  $K_1, K_2, K_3$  равен:

$$K_m = 1/(K_2 + K_3) \text{ или } K_m = 1/(1 - K_1).$$

При этом область существования коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  будет равна:  $0 \leq K_3 \leq 1$ ;  $0 \leq K_2 \leq 1$ ;  $-1 \leq K_1 \leq 1$ . Использование этих показателей упрощает определение и прогнозирование запаса надежности по выходному параметру. Тогда показатели  $\delta_m, P(t), K_m$ , определенные за межладоочный период, являются исходными данными для прогнозирования ресурса МС с ЧПУ по выходному параметру  $T_p$ .

Экспериментальные исследования по оценке погрешности позиционирования и влиянию теплового режима на точность перемещения оси шпинделя рассмотрим на примере МС с ЧПУ модели MC12-250 (класс точности В ГОСТ 8-81). Все замеры осуществлялись при помощи измерительного комплекса "Сигнал-1", разработанного Институтом надежности машин Национальной Академии Наук Республики Беларусь. Статистическая обработка результатов измерений проводилась по разработанной методике испытаний [3]. Усредненные показатели точности позиционирования приведены в таблице 1:  $P_\alpha, P_r$  - точность позиционирования при одностороннем подходе в прямом и обратном направлении соответственно;  $P_{s\alpha}, P_{sr}$  - стабильность позиционирования при одностороннем подходе в прямом и обратном направлении,  $P_\alpha$  - точность позиционирования при двухстороннем подходе,  $P_{s\alpha}$  - стабильность позиционирования при двухстороннем подходе;  $U$  - зона нечувствительности при реверсировании.

Таблица 1

Показатели точности позиционирования рабочего органа

в микрометрах	$P_\alpha$	$P_{s\alpha}$	$P_r$	$P_{sr}$	$P_\alpha$	$P_{s\alpha}$	$U$
в начальный момент	46	12	47	13	50	13	4
в конце $T_{mn}$	49	13	48	15	55	15	4

Величины смещения оси шпинделя от тепловых деформаций измерялись бесконтактным методом индуктивными преобразователями в плоскостях YOZ и XOZ. Предварительные экспериментальные исследования подтвердили предположение о термосимметричности данной конструктивной компоновки станка. Дрейф оси шпинделя для частот вращения 500 и 1000 мин<sup>-1</sup> показан на рисунке 36, при вылете ползуна  $Z = 100$  мм.

На рисунке 3а показаны графики смещения оси шпинделя в плоскости YOZ при наиболее характерной частоте вращения шпинделя 1000 мин<sup>-1</sup>. Положение ползуна (смещение вдоль координаты Z) принималось исходя из возможного вылета инструмента и среднего положения плоскости обработки в рабочей зоне станка. Как видно из графика смещение оси шпинделя от его начального положения для одного и того же режима работы в направлении Y (относительно плоскости обработки) происходит по разным законам, от классического экспоненциального ( $Z=50, 100$  мм) до знакопеременного ( $Z=0$ ). Установившиеся тепловые деформации  $\Delta L_y$  стабилизируются в интервале 30-40 мин времени холостого хода, что достаточно для нахождения функции изменения  $\Delta L$  по методике [4]. Диапазон максимальных текущих значений смеще-

ния оси шпинделя в плоскости YOZ для частот 1000 и 1600 мин<sup>-1</sup> будет колебаться от 20 до 50 мкм.

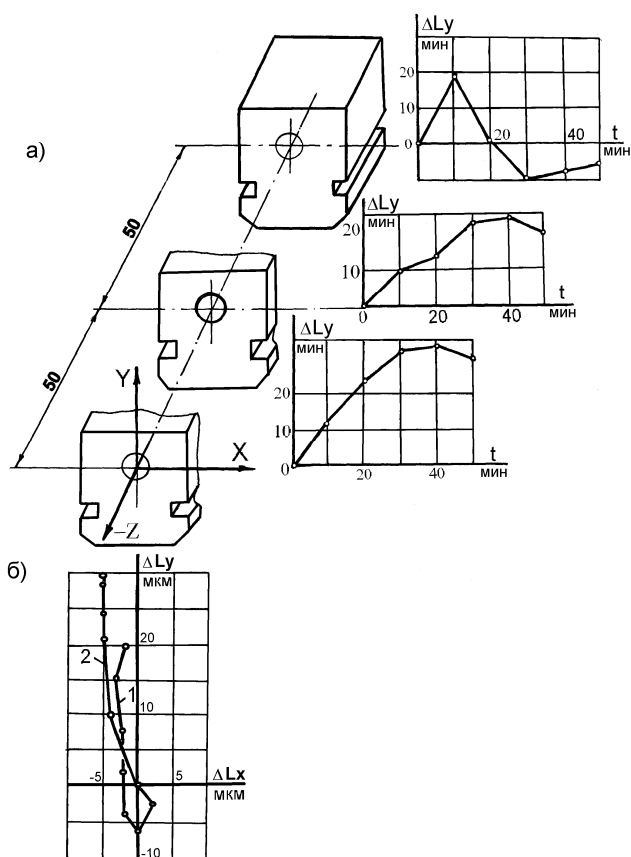


Рисунок 3. Смещение оси шпинделя в плоскости YOZ при частоте вращения 1000 мин<sup>-1</sup> в зависимости от положения плоскости обработки (а), в плоскости XOY при частоте вращения 500 мин<sup>-1</sup> (1) и 1000 мин<sup>-1</sup> (2) (б)

Произведем оценку показателей технологической надежности данного станка. В качестве выходного параметра станка примем частное значение общего выходного показателя - точность координатных перемещений при формировании линейного размера на детали станком вдоль координаты Y.

Количественные значения составляющих погрешности в начальный момент работы станка составляли:  $\Delta_{np}=0,5$  мкм ( $\Delta_{np}=1/2 d$ , где  $d$  - дискретность системы ЧПУ вдоль координаты Y);  $U=4$  мкм,  $P_{s\alpha}=13$  мкм.

При формировании станком линейного размера с допуском  $\delta=46$  мкм (что соответствует IT7 исходя из класса точности станка В и максимально возможному перемещению вдоль координаты Y равному 250 мм) показатели параметрической надежности будут равны:  $K_1=0,3$ ;  $K_2=0,28$ ;  $K_3=0,42$  при условии, что величина запрограммированного перемещения  $Y_{np}$  соответствовала середине поля допуска на размер (см. рисунок 2). Тогда  $P(t) \rightarrow 1, K_m=1,43$ .

В конце межладоочного периода ( $T_{mn}=8$  часам) произойдет смещение центра группирования составляющих погрешностей на величину  $\Delta_c=20$  мкм, при  $l_2=15$  мкм и частоте вращения шпинделя 1000 мин<sup>-1</sup>. Тогда показатели будут равны:  $K_1=-0,19$ ;  $K_2=0,33$ ;  $K_3=0,86$ ;  $K_m=0,84$ ;  $P(t)=0,929$ . То есть в этом случае возможен отказ по принятому выходному

показателю. При увеличении  $\Delta$  до 50 мкм возможна обработка только по IT9 с допуском 115 мкм.

Коррекция величины смещения  $Y$  на величину 17 мкм позволяет вести обработку с допуском 72 мкм (IT8) на длине перемещения 180-250 мм.

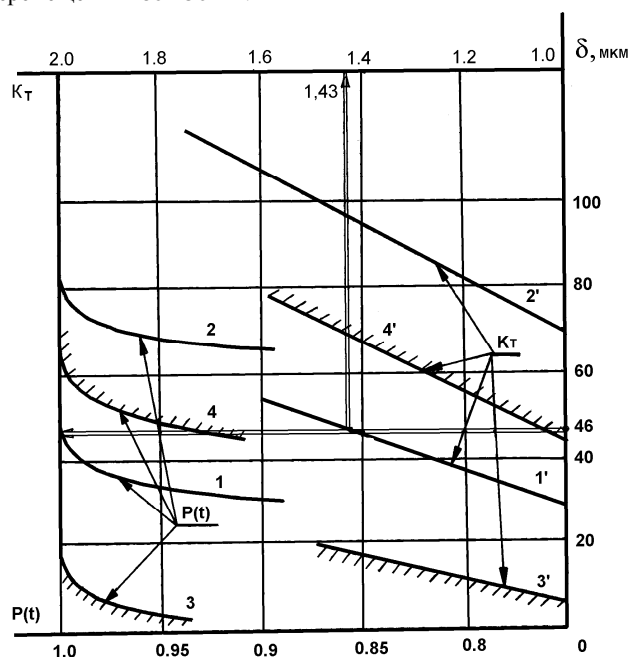


Рисунок 4. Область существования показателей технологической надежности  $P(t)$ ,  $K_T$  многоцелевого станка с ЧПУ мод. MC12-250

На рисунке 4 показаны области существования значений  $K_T$  и  $P(t)$  для рассматриваемого станка. Кривая 1 и прямая 1' характеризуют начальное состояние станка и изменение пока-

зателей  $P(t)$  и  $K_T$  в зависимости от назначаемого допуска на рассматриваемый размер.

Характер изменения  $P(t)$  и  $K_T$  в конце межналадочного периода представлен кривой 2 прямой 2'.

Линии 3 и 3' дают нижнюю границу изменения показателей  $P(t)$  и  $K_T$  при условии полной компенсации случайных составляющих погрешностей, т.е.  $K_2=0$  при  $0 \leq K_3 \leq 1$ . Наконец, линии 4 и 4' дают нижнюю границу изменения показателей  $P(t)$  и  $K_T$  в зависимости от назначаемого допуска при компенсации систематических составляющих погрешностей до уровня  $l_0=l_1$ , то есть когда  $K_2=K_3$ .

Таким образом, используя данные графики, а также исходя из известных и прогнозируемых погрешностей, формирующих выходной параметр, можно судить о технологических возможностях МС и назначать точность обработки. Возможно также решение обратной задачи. В соответствии с требуемым уровнем технологической надежности выбирать экономически целесообразные значения выходных параметров точности МС с ЧПУ, а также методы рациональной их эксплуатации.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проников А.С. Программный метод испытания металло-режущих станков. - М.: Машиностроение, 1985.-288с.
2. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / Под. ред. А.С. Проникова- М.: Машиностроение, 1982.-256с.
3. Григорьев В.Ф., Горбунов В.П. Измерение точности позиционирования рабочих органов станков с ЧПУ. Методические указания к лабораторной работе. - Брест, БПИ, 2000.-18с.
4. Горбунов В.П., Григорьев В.Ф. Исследование влияния теплового режима на точность многоцелевого станка с ЧПУ. - Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике/ Труды X научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов. Ч1. - Брест, БПИ, 1998.- с.12-17.

УДК 699.539.43

Трусь А. М., Александров Ю. А.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Считается что более 80% отказов машин, механизмов и технических устройств связано с усталостью материалов [1].

Первоначально, после открытия явления усталости, его связывали со структурными изменениями материала в результате циклических нагрузок [2].

В настоящее время первоначальная точка зрения отвергнута. Считается, что усталость является результатом накопления местных повреждений на дефектах структуры. Сначала они носят характер местных микросдвигов постепенно интегрирующихся в объемное напряжённое состояние хрупкого разрушения, независимо от пластичности материала [3].

Последняя точка зрения неубедительна, т. к. при накоплении повреждений должна снижаться статическая прочность материала, а она фактически сохраняется неизменной, как до усталостного испытания, так и после него. Усталостные повреждения статическими испытаниями на прочность не обнаруживаются, что порождает существующую теорию [4].

Широко известные работы Гриффитса и Ирвина по энерге-

тическому исследованию несоответствия теоретической и фактической прочности хрупких материалов привели к выводу о их поражении дефектами структуры [4]. Предположение, что усталость является результатом расширения этих дефектов, за счёт концентрации напряжений, не отвечает на вопрос за счёт какой энергии совершается работа хрупкого разрушения пластичного материала [5]?

Целью настоящей работы является выяснение этого вопроса

Воспользуемся графиком статической и циклической прочности 12-ти стальных образцов, которые испытывались попарно при растяжении и сжатии циклически, а после усталости одного, второй подвергался статическому разрушению, как показано схематически на рисунке 1 кривыми 1 и 2.

Соотношение между циклическим и статическим пределом прочности  $n$  выразим:

$$\frac{\sigma - 1}{\sigma_u} = n \quad (1)$$

Трусь Александр Михайлович. К.т.н., профессор каф. СМиТМ Брестского государственного технического университета.

Александров Юрий Александрович. Аспирант каф. СМиТМ, старший преподаватель каф. МиМ Брестского государственного технического университета.

БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.